

ANÁLISE DE *FRETTING*-CORROSION NO TAPER TRUNNION DE PRÓTESES DE QUADRIL FABRICADAS EM AÇO INOXIDÁVEL ISO 5832-1 E 5832-9

Vinícius Oliveira dos Santos¹ Patricia Ortega Cubillos² André Luís Almeida Pizzolatti³ Claudio Teodoro dos Santos⁴ Ieda Maria Vieira Caminha⁵ Maurício de Jesus Monteiro⁶ Carlos Rodrigo de Melo Roesler⁷

Resumo

A presente pesquisa visa investigar o processo de *fretting-corrosion* no cone da haste femoral de próteses de quadril fabricadas em aço inoxidável. Foram avaliados dois grupos de componentes femorais. As hastes analisadas foram fabricadas em aço inoxidável ISO 5832-1 (grupo I) e aço inoxidável ISO 5832-9 (grupo II). A metodologia consistiu em realizar o ensaio de fadiga em meio corrosivo e posterior análise de *fretting-corrosion* de forma qualitativa e quantitativa. Os resultados demonstraram que os requisitos químicos e metalúrgicos dos componentes dos dois grupos estavam de acordo com as exigências das normas técnicas. As hastes do grupo I, tiveram um desempenho inferior às hastes do grupo II com relação ao desempenho em *freeting-corrosion*. As hastes do grupo I apresentaram uma área afetada por corrosão muito elevada, fato que pode aumentar a probabilidade de eventos adversos no corpo humano relacionados as partículas metálicas, reduzindo assim a segurança e eficácia desses componentes a longo prazo no corpo humano.

Palavras-chave: FRETTING-CORROSION, HASTE FEMORAL; ISO 5832-1; ISO 5832-9.

FRETTING-CORROSION ANALYSE IN THE TAPER TRUNION OF HIP PROSTHESIS MANUFACTURED IN WROUGHT STAINLESS STEEL ISO 5832-1 AND 5832-9

Abstract

The present study aim investigates the *fretting*-corrosion process in the taper trunnion of hip prosthesis manufactured with metallic alloys of stainless steel that comply the requirements of standards ISO 5832-1 and ISO 5832-9. Two groups of femoral components were evaluated: group I - manufactured with wrought stainless steel according ISO 5832-1; group II – manufactured with wrought high nitrogen stainless steel according ISO 5832-9. The samples were submitted to fatigue trial in corrosive medium and the *fretting*-corrosion was analyzed qualitatively (Goldberg criterion) and quantitatively (affected area). Results showed that chemical and metallurgical requirements of the analyzed stems and heads of both groups were in accordance with the requirements of ISO technical standards. The stems of the group I had a lower performance than the stems of group II. Stems group I showed a high area affected by corrosion, which can increase the probability of adverse events in the



human body related to the metal particles. and reduce the safety and efficacy of these components during a long-time period inside of human body.

Keywords: FRETTING-CORROSION, FEMORAL HEAD; ISO 5832-1; ISO 5832-9.

- ¹ Engenheiro de Materiais, Engenheiro., pesquisador, LEBm, HU, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis,SC, Brasil.
- ² Engenharia de Materiais, D.Sc., pesquisadora, LEBm, HU, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, Brasil.
- ³ Fisioterapeuta, Doutorando em Engenharia de Materiais, pesquisador, LEBm, HU, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis,SC, Brasil.
- ⁴ Engenheiro de Materiais, D.Sc., tecnologista, DEMP, LACPM, Instituto Nacional de Tecnologia (INT), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ⁵ Engenheira Metalúrgica, D.Sc., tecnologista, DEMP, LACPM, Instituto Nacional de Tecnologia (INT), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ⁶ Engenheiro Mecânico, D.Sc., tecnologista, DEMP, LACPM, Instituto Nacional de Tecnologia (INT), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ⁷ Engenheiro Mecânico, D.Sc., professor, LEBm, HU, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis,SC, Brasil.



1 INTRODUÇÃO

O advento de próteses de quadril modulares, em que o componente femoral é dividido em haste femoral e cabeça possui diversas vantagens em relação às próteses não modulares. A modularidade permite ao médico cirurgião o controle da posição da cabeça em relação à haste, a utilização de cabeças artificiais com diferentes diâmetros para a mesma haste, além da possibilidade de empregar materiais diferentes para haste e para a cabeça femoral [1,2].

Por outro lado, a modularidade tra consigo o risco de micromovimentos na conexão haste-cabeça, devido às diferenças macro e microgeométricas entre o cone da haste *(taper trunnion)* e a cavidade cônica da cabeça *(taper bore)*. Tais diferenças podem ser geradas por definições de tolerância dimensional na fabricação dos componentes, topografia da superfície, e tipo de interface [3]. A ocorrência de micromovimentos promove o desgaste da interface, conhecido como *fretting*, e sucessivas remoções e crescimento da camada passiva. Isso resulta na variação do potencial de corrosão na região afetada e aumento a susceptibilidade a corrosão [4]. Além do desgaste, a interface haste/cabeça também poderá sofrer o processo de corrosão por fenda (*crevice corrosion*) em virtude da exposição aos fluidos corporais [5]. A relação sinérgica entre corrosão e desgaste resulta no processo conhecido como *fretting-corrosion* [6].

As partículas metálicas geradas nas conexões das próteses de quadril são conhecidas por desencadear reações adversas nos tecidos moles. Recentemente, a atenção cientifica está focada no estudo de superfícies metal-metal (MoM). Pacientes com reações adversas por partículas metálicas apresentam dor, formação de pseudotumores nos tecidos moles, instabilidade ou lesões assintomáticas [7]. O aumento da incidência de eventos adversos tem motivado vários autores a investigarem as causas do *fretting-corrosion* por meio da quantificação ou classificação do dano gerado no implante, bem como tem gerado a busca por soluções alternativas para evitar ou minimizar o fenômeno de *fretting-corrosion* [8–11].

Além da biocompatibilidade, a resistência a corrosão e as propriedades mecânicas, das ligas empregadas em próteses de quadril, são fundamentais para o sucesso da artroplastia total de quadril. As principais ligas empregadas nos componentes metálicos das próteses de quadril são de titânio, cobalto-cromo e alguns tipos de aços inoxidáveis austeníticos [12]. No Brasil, as ligas mais empregadas são de aço inoxidável forjado 18Cr-14Ni-2,5Mo, conforme especificado pela norma ISO 5832-1, e também o aço inoxidável conformado de alto teor de nitrogênio, conforme especificado pela norma ISO 5832-9 [13]. Essas ligas são escolhidas, em geral, pela sua resistência mecânica, por sua resistência à corrosão e pelo seu baixo custo [14–16].

Com base no exposto, o objetivo do presente artigo foi avaliar a resistência ao *fretting-corrosion* de forma qualitativa, pelo critério de Goldberg, e quantitativa, pela razão de área afetada, nos cones das hastes de quadril fabricadas com aço inoxidável ISO 5832-1 e ISO 5832-9, a fim de identificar as diferenças no comportamento *in vitro* destes materiais.



2 MATERIAIS E MÉTODOS

Dois grupos de componentes femorais foram avaliados com relação às características do material e comportamento em ensaio de fadiga em meio corrosivo. Cada grupo contém ao todo seis pares de hastes/cabeças femorais (n = 6). As hastes foram fabricadas com diferentes aços inoxidáveis: grupo I, aço inoxidável conformado (ISO 5832-1), e grupo II, aço inoxidável conformado de alto nitrogênio (ISO 5832-9). As cabeças femorais utilizadas para realizar o ensaio mecânico em ambos os grupos foram fabricadas com aço inoxidável conformado (ISO 5832-1). Na Tabela 1 encontram-se outras informações das hastes e cabeças avaliadas.

Componente	Haste femoral	Grupo I	Grupo II		
Haste Femoral	Tipo	Cimentada	Cimentada		
	Acabamento superficial	Polida	Polida		
	Comprimento da haste	150	150		
	Offset (mm)	37,5	37,5		
	Cone (taper trunnion)	12/14	12/14		
	Material	Aço inoxidável austenítico	Aço inoxidável austenítico de alto		
	Especificação	ISO 5832-1	ISO 5832-9		
Cabeça Femoral	Acabamento superficial	Polida	Polida		
	Diâmetro externo (mm)	28	28		
	Cone (taper bore)	12/14	12/14		
	Matorial	Aço inoxidável	Aço inoxidável		
	Wateria	austenítico	austenítico		
	Especificação	ISO 5832-1	ISO 5832-1		

Tabela 1. Características técnicas das hastes e cabeças femorais avaliadas.

Três pares de hastes e cabeças de cada grupo foram utilizados para caracterização do material e os outros três pares de cada grupo foram empregados nos ensaios de fadiga em meio corrosivo e posteriormente foi realizado a análise de *fretting-corrosion* de forma qualitativa, pelo critério de Goldberg, e quantitativa, pela razão de área afetada, no cone das hastes femorais.

2.1 Análise de composição química

A composição química foi realizada mediante a técnica de espectrometria de emissão ótica nos três (3) conjuntos de cabeça e haste analisados para cada grupo, conforme ASTM E415-13e45 (*Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry*).

2.2 Análise de microestrutura

As amostras das cabeças e hastes analisadas durante a análise microestrutural foram preparadas e atacadas quimicamente de acordo com as normas ASTM E 3 (*Preparation of Metallographic Specimens*) e ASTM E 407 (*Microetching Metals and Alloys*), respectivamente.

As seções transversais das amostras das hastes e cabeças foram aquecidas até 70 °C e, em seguida, atacadas quimicamente de acordo com uma solução de 10 ml de HNO₃ e 30 ml de HCl.



2.3 Ensaio de fadiga em meio corrosivo

O ensaio de fadiga nos conjuntos de hastes e cabeças para cada um dos grupos foi realizado segundo procedimento recomendado pela norma ISO 7206-4, com duas modificações: foi empregado uma solução de 9,0 g/L de cloreto de sódio (NaCl) e o ensaio foi prolongado até 10 milhões de ciclos.

O ensaio foi realizado em uma máquina de teste universal *Instron* 8872, com uma célula de carga de 25 kN. O ensaio foi realizado com controle de força, aplicando uma força senoidal de 300 N a 2300 N com uma frequência de 5 Hz, conforme recomendação da norma ISO 7206-4 para hastes com comprimento entre 120 mm e 250 mm.

A haste foi posicionada e cimentada de acordo com os requisitos da norma ISO 7206-4 empregando-se cimento ósseo (PMMA) a uma distância de 80 mm do centro da cabeça femoral em relação a região distal da haste e com ângulos de flexão (α) e abdução (β) de 10° e 9° respectivamente.

2.4 Análise de fretting-corrosion no cone da haste

A análise de *fretting-corrosion* foi realizada na região do cone da haste que estava em contato com a cabeça femoral nas posições anterior, medial, posterior e lateral, conforme Figura 1.



Figura 1. Áreas do cone analisadas, considerando uma haste para perna direita.

Posteriormente, macrografias para análise de *fretting-corrosion* foram obtidas com estereoscópio Optika Microscoper Italy modelo SZ-CTV em quatro posições identificadas na Figura 1.

A análise qualitativa foi realizada através da aplicação dos critérios de Goldberg [9] em toda a superfície do cone da haste. A definição dos graus de severidade de corrosão e *fretting* está descrito na Tabela 2.



 Tabela 2. Critério de classificação de corrosão e desgaste. Adaptado de Goldberg[9]

Grau de severidade	Severidade de corrosão ou desgaste	Тіро	Critério				
1	Nenhum	Corrosão	Nenhum tipo de corrosão identificado				
		Fretting	Nenhum tipo de desgaste identificado				
2		Corrosão	< 30% da superfície descolorida ou fosca				
	Suave	Fretting	Uma ou mais bandas com marcas de <i>fretting</i> que envolvam no máximo três linhas de usinagem na superfície				
3	Moderado	Corrosão	 > 30% da superfície descolorida ou fosca < 10% da superfície contendo partículas pretas, <i>pites</i> ou marcas de ataque corrosivo 				
		Fretting	Uma ou mais bandas com marcas de <i>fretting</i> envolvendo mais de três linhas de usinagem na superfície				
4	Severo	Corrosão	> 10% da superfície contendo partículas pretas, pites ou marcas de ataque corrosivo				
		Fretting	Muitas bandas com marcas de <i>fretting</i> envolvendo várias marcas de usinagem adjacentes ou áreas deformadas com marcas de <i>fretting</i>				

A análise quantitativa foi realizada através da quantificação da razão percentual entre as áreas afetadas por corrosão ou *fretting* nas quatro posições (Figura 1) e a área total do cone da haste, a partir das análises das macrografias obtidas previamente.

2.5 Análise estatística

A fim de avaliar diferenças entre os grupos foi aplicado o teste t de *Student* bicaudal, com variância homocedástica e nível de significância de 0,05.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise química das hastes e cabeças

As análises de composição química dos componentes dos Grupos I e II demonstrou que ambos os grupos possuem cabeças e hastes com composição química que cumprem os requisitos das normas técnicas ISO 5832-1 e 5832-9, como pode ser constatado na Tabela 3.



Tabela 3. Resultado da análise de composição química dos componentes do Grupo I e II.											
ELEMENTO		С	Mn	Si	Р	S	Cr	Ni	Мо	Cu	Ν
Grupo I (% massa)	ISO 5832-1	0,030 máx.	2,00 máx.	0,75 máx.	0,025 máx.	0,010 máx.	17,00 - 19,00	13,00 _ 15,00	2,25 - 3,00	0,50 máx.	0,10 máx.
	Haste	0,02	1,77	0,25	0,02	<0,001	18,77	15,03	2,53	0,12	0,08
	Cabeca	<u>±0,01</u>	1.63	10,03			17 27	15.00	2 05	$\pm 0, 10$	
	femoral	±0,01	±0,06	±0,03	±0,02	<0,001	±0,38	±0,25	±0,11	±0,04	±0,00
Grupo II (% massa)	ISO 5832-9	0,08 máx.	2 _ 4,25	0,75 máx.	0,025 máx.	0,010 máx.	19,5 - 22	9 - 11	2 - 3	0,25 máx.	0,25 - 0,5
	Haste	0,04	3,83	0,14	0,01	0,00	19,53	9,77	2,31	0,04	0,33
	femoral	±0,02	±0,06	±0,06	±0,01	±0,00	±1,03	±1,17	±0,31	±0,01	±0,06
	ISO 5832-1	0,030 máx.	2,00 máx.	0,75 máx.	0,025 máx.	0,010 máx.	17,00 _ 19,00	13,00 _ 15,00	2,25 - 3,00	0,50 máx.	0,10 máx.
	Cabeça femoral	0,02 ±0,00	1,70 ±0,13	0,37 ±0,12	-	<0,001	17,43 ±0,80	14,60 ±1,31	2,80 ±0,35	0,10 ±0,01	0,08 ±0,01

O material das hastes do grupo II possui um teor de nitrogênio quatro vezes superior as hastes do grupo I. O maior teor de nitrogênio aumenta a estabilidade da austenita, aumentando a resistência mecânica e resistência ao *pitting* [13,17,18]. Além disso, a resistência mecânica aumenta por endurecimento por solução sólida, refino de grão e precipitação de nitretos ricos em nióbio, cromo e molibdênio [13]. Por outro lado, a resistência a corrosão aumenta pela formação de uma camada de nitrogênio negativamente carregado sobre a camada passiva, sendo que a segunda camada inibe a absorção de íons do tipo Cl⁻, evitando a formação de *pitting* [18].

3.2 Fases presentes na haste e na cabeça

Os resultados metalúrgicos permitem evidenciar que a microestrutura das hastes e cabeças femorais são homogêneas constituídas por grãos austeníticos, sem a presença de ferrita delta, fase chi ou fase sigma quando observado a 100x, como pode ser visualizado na Figura 2. Desta forma, ambos os componentes do grupo I (cabeça e haste) estão de acordo com os requisitos de microestrutura exigido pela norma ISO 5832-1.







Na Figura 3 estão presentes imagens da microestrutura das amostras da haste e cabeça do grupo II. As microestruturas de ambos os componentes, hastes e cabeças, são constituídas por grãos austeníticos, sem a presença de ferrita delta, fase chi ou fase sigma quando observado a 100x. Na microestrutura das hastes femorais pode ser observado fases escuras denominadas como fase-Z, que são características de materiais que possuem alto teor de nitrogênio [13]. Desta forma, as hastes e cabeças femorais do grupo II também estão de acordo com os requisitos de microestrutura exigido pela norma ISO 5832-9 e ISO 5832-1 respectivamente.



Figura 3. Imagem a 100x e 500x da região central da haste e cabeça femoral do grupo II.

3.3 Análise de fretting-corrosion no cone da haste

A análise de *fretting-corrosion* do cone da haste foi realizada após o ensaio de fadiga em meio corrosivo. A superfície da posição lateral das hastes dos grupos I e II é apresentada na Figura 4. Nos cones das hastes do grupo I (ISO 5832-1) foi identificada uma grande área afetada por corrosão, com forte oxidação que evidencia o ataque corrosivo. Nos cones das hastes do grupo II (ISO 5832-9) observou-se pouca ou quase nenhuma marca de ataque corrosivo, apresentando principalmente marcas de *fretting*.





Figura 4. Superfície da posição lateral das seis hastes após o ensaio de fadiga em meio corrosivo.

Os resultados da aplicação da análise de *fretting-corrosion* qualitativa, aplicando os critérios de Goldberg, e quantitativa, pela razão de área afetada por *fretting* ou corrosão, do cone da haste femoral estão apresentados na Figura 5.

Através da aplicação do critério de Goldberg a análise qualitativa revelou que os cones de todas as hastes do grupo I apresentaram o grau 3 de severidade de *fretting*. Já o grupo II apresentou duas hastes com cones com grau 3 de severidade e uma haste com grau 4 de severidade no cone. Os cones das hastes que apresentavam grau 3 foram classificadas dessa forma, pois existiam bandas com marcas de *fretting* envolvendo mais de três linhas de usinagem na superfície, enquanto que a haste com grau 4 de severidade possuía várias bandas com marcas de *fretting* envolvendo várias marcas de usinagem adjacentes. Ao realizar a quantificação da área afetada por *fretting*, os cones das hastes do grupo I apresentaram em média 3,1 % da área afetada por *fretting*, enquanto que os cones das hastes do grupo II possuíam em média 29,0% da área afetada.

Em relação a análise de corrosão no cone, pela análise qualitativa, todas as hastes do grupo I (ISO 5832-1) apresentaram o grau 4 de severidade e todas as hastes do grupos II (ISO 5832-9) apresentaram severidade de grau 3, dado que, o grupo I possuía mais de 10% da área analisada com marcas de ataque corrosivo e o grupo II menos de 10% da área afetada. Ao quantificar a área afetada por corrosão, em média 50,1% da área do cone das hastes do grupo I apresentavam marcas de ataque corrosivo, enquanto que os cones das hastes do grupo II apresentavam em média 2,3% da área afetada por corrosão.





Figura 5. Média dos resultados da análise de *fretting* por quantificação de área. Os pontos são referentes ao grau de severidade de *fretting-corrosion* de acordo com os critérios de Goldberg. As barras são referentes a porcentagem de área afetada por *fretting* ou corrosão.

Ao realizar a análise estatística, as hastes do grupo I apresentaram uma área afetada por *fretting* significativamente diferente as hastes do grupo II (p = 0,021), em média quase 6 vezes inferior as hastes do grupo II. Apesar dessa diferença significativa entre as áreas afetadas, ao avaliar o *fretting* diretamente pelo critério de Goldberg não há uma diferença entre os grupos, dado que apenas uma haste do grupo II apresentava grau 4 de severidade no cone e as demais hastes de ambos os grupos apresentavam grau 3 de severidade no cone.

Os cones das hastes do grupo II apresentaram uma área maior afetada pelo *fretting*, sendo que as áreas com marcas de corrosão foram visualmente inferiores as hastes do grupo I. O resultado de análise de *fretting* das hastes do grupo I foi influenciado pela corrosão gerada, visto que o processo de desgaste por *fretting* resulta em sucessivas remoções e crescimento da camada passiva, aumentando susceptibilidade a corrosão [4].

Ao aplicar o critério de Goldberg para avaliação da severidade de corrosão no cone das hastes, há uma diferença de apenas 1 grau de severidade entre as hastes do grupo I (grau 4) e grupo II (grau 3). No entanto, a área média afetada por corrosão no cone das hastes do grupo I foi de 50,1%, enquanto que os cones das hastes do grupo II apresentavam em média 2,3% da área afetada, valor significativamente diferente (p = 0,025).

A diferença de corrosão apresentada pelos grupos pode ser resultado da maior resistência a corrosão do aço inoxidável conformado com alto nitrogênio (ISO 5832-9) em relação ao aço inoxidável conformado (ISO 5832-1) como mencionado na literatura em relação a liga [13]. Este material está sendo cada vez mais utilizado no Brasil como uma alternativa para a substituir o aço ISO 5832-1, dada sua maior resistência a corrosão e melhores propriedades mecânicas [13–16].

O elevado valor de corrosão gerado nos cones das hastes do grupo I pode ser um fator limitante para próteses de quadril. Além do mais, estudos prévios apontam que a suscetibilidade à corrosão localizada da liga descrita na ISO 5832-1 (aço



inoxidável conformado) limitam o emprego desse material para próteses permanentes [13].

Sendo assim, a substituição para o aço descrito na ISO 5832-9 é uma alternativa a ser aplicada em próteses de quadril, já que, como evidenciado na avaliação das hastes de ambos os grupos, as hastes do grupo I apresentaram uma área afetada por corrosão muito elevada e por consequência uma maior quantidade de partículas metálicas, o que aumenta o risco de gerar processos inflamatórios ou a formação de metalose e pseudotumores [19,20].

4 CONCLUSÃO

A avaliação das ligas metálicas de aço inoxidável e aço inoxidável de alto nitrogênio, permitiu estabelecer que todos os requisitos de composição química e metalúrgicos estão de acordo com as exigências das normas técnicas ISO 5832-1 e ISO 5832-9.

Ao aplicar a análise qualitativa com os critérios de Goldberg na superfície dos cones das hastes não fica evidente a diferença quanto ao dano gerado por *fretting* e corrosão.

Ao quantificar a área afetada por *fretting-corrosion* as hastes do grupo II, fabricadas com aço inoxidável de alto teor de nitrogênio conforme ISO 5832-9, obtiveram um resultado superior as hastes do grupo I.

O aço inoxidável ISO 5832-1 conformado é um dos mais utilizados no Brasil [13]. Entretanto, os resultados das análises de *fretting-corrosion* demostraram que as hastes fabricadas com esta matéria-prima apresentam em média 50% da área afetada por corrosão, o que tende a aumentar a probabilidade de efeitos adversos no corpo humano relacionados as partículas metálicas geradas pelo processo de *fretting-corrosion*, reduzindo assim a segurança e eficácia desses componentes em longo prazo.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pelo Fundo Nacional da Saúde, . O trabalho também recebeu apoio financeiro complementar da FAPERJ, FAPESC e CNPq.

REFERÊNCIAS

- [1] Tan SC, Teeter MG, Del Balso C, Howard JL, Lanting BA. Effect of taper design on trunnionosis in metal on polyethylene total hip arthroplasty. J Arthroplasty 2015;30:1269–72.
- [2] Preuss R, Lars Haeussler K, Flohr M, Streicher RM. Fretting corrosion and trunnion wear-is it also a problem for sleeved ceramic heads? Semin Arthroplasty 2012;23:251–7.
- [3] Jauch-Matt SY, Miles AW, Gill HS. Effect of trunnion roughness and length on the modular taper junction strength under typical intraoperative assembly forces. Med Eng Phys 2017;39:94–101.
- [4] Kumar S, Sankara Narayanan TSN, Ganesh Sundara Raman S, Seshadri SK. Evaluation of fretting corrosion behaviour of CP-Ti for orthopaedic implant applications. Tribol Int 2010;43:1245–52.
- [5] Panagiotidou A, Meswania J, Hua J, Muirhead-Allwood S, Hart A, Blunn G. Enhanced wear and corrosion in modular tapers in total hip replacement is



associated with the contact area and surface topography. J Orthop Res 2013;31:2032–9.

- [6] Pellier J, Geringer J, Forest B. Fretting-corrosion between 316L SS and PMMA: Influence of ionic strength, protein and electrochemical conditions on material wear. Application to orthopaedic implants. Wear 2011;271:1563–71.
- [7] Whitehouse MR, Endo M, Zachara S, Nielsen TO, Greidanus N V., Masri BA, et al. Adverse local tissue reactions in metal-onpolyethylene total hip arthroplasty due to trunnion corrosion: The risk of misdiagnosis. Bone Jt J 2015;97–B:1024–30.
- [8] Bryant M, Ward M, Farrar R, Freeman R, Brummitt K, Nolan J, et al. Characterisation of the surface topography, tomography and chemistry of fretting corrosion product found on retrieved polished femoral stems. J Mech Behav Biomed Mater 2014;32:321–34.
- [9] Goldberg JR, Gilbert JL, Jacobs JJ, Bauer TW, Paprosky W, Leurgans S. A multicenter retrieval study of the taper interfaces of modular hip prostheses. Clin Orthop Relat Res 2002;401:149–61.
- [10] Di Prima MA, Vesnovsky O, Kovacs P, Hopper RH, Ho H, Engh CA, et al. Comparison of visual assessment techniques for wear and corrosion in modular hip replacement systems. ASTM Spec. Tech. Publ., vol. STP 1591, 2015.
- [11] Higgs GB, Hanzlik J a., MacDonald DW, Kane WM, Day JS, Klein GR, et al. Method of characterizing fretting and corrosion at the various taper connections of retrieved modular components from metal-on-metal total hip arthroplasty. Met Total Hip Replace Devices 2013:146–56.
- [12] Bezerra E de OT, Nascimento JJ da S, Luna CBB, Morais CR da S, Campos KVM de. Avaliação de não conformidades de próteses de quadril fabricadas com ligas de titânio e aço inox. Rev Matéria 2017;22.
- [13] Giordani EJ, Ferreira I, Balancin O. Propriedades mecânicas e de corrosão de dois aços inoxidáveis austeníticos utilizados na fabricação de implantes ortopédicos. Rem Rev Esc Minas 2007;60:55–62.
- [14] Silva E da F e, Oliveira LFC de. Caracterização química e metalográfica dos aços inoxidáveis de implantes removidos de pacientes. Acta Ortopédica Bras 2011;19:855–78.
- [15] Caetano RR, Jr ARF, Pinedo CE. Características de formação da austenita expandida na nitretação por plasma do aço inoxidável austenítico aisi 316 grau astm f138. Núcleo Pesqui Tecnológicas Da Univ Mogi Das Cruzes, Mogi Das Cruzes, SP, Bras 2010;63:143–6.
- [16] OLIVEIRA FS. Caracterização e propriedades mecânicas de próteses para quadril. Diss Inst Mil Eng Rio Janeiro 2013.
- [17] Örnhagen C, Nilsson JO, Vannevik H. Characterization of a nitrogen-rich austenitic stainless steel used for osteosynthesis devices. J Biomed Mater Res 1996;31:97–103.
- [18] Grabke HJ. High Nitrogen Steels. The Role of Nitrogen in the Corrosion of Iron and Steels. ISIJ Int 1996;36:777–86.
- [19] Cooper HJ, Urban RM, Wixson RL, Meneghini RM, Jacobs JJ. Adverse local tissue reaction arising from corrosion at the femoral neck-body junction in a dualtaper stem with a cobalt-chromium modular neck. J Bone Joint Surg Am 2013;95:865–72..
- [20] Green G, Khan M, Haddad FS. (i) Why do total hip replacements fail ? Orthop Trauma 2014;29:79–85.